

Μελέτη και Μοντελοποίηση των Μειώσεων Forbush της Έντασης της Κοσμικής Ακτινοβολίας

Χ. Πλαϊνάκη, Α. Παπαϊωάννου, Ε. Μαυρομιχαλάκη

*Τομέας Πυρηνικής Φυσικής και Στοιχειωδών Σωματιδίων, Τμήμα Φυσικής,
Πανεπιστήμιο Αθηνών*

cplainak@phys.uoa.gr; atrapaio@phys.uoa.gr; emavromi@phys.uoa.gr

Περίληψη

Οι μειώσεις Forbush της έντασης της κοσμικής ακτινοβολίας είναι ένα ηλιοσφαιρικό φαινόμενο, το οποίο αφορά τις μεταβολές της πυκνότητας και της ανισοτροπίας των γαλαξιακών κοσμικών ακτίνων, που προκαλούνται από διαδιδόμενες διαταραχές του ηλιακού ανέμου σε μεγάλη κλίμακα. Σύμφωνα με τις μέχρι τώρα παρατηρήσεις, οι μειώσεις Forbush διακρίνονται σε μη περιοδικές (non-recurrent) οφειλόμενες σε παροδικά διαπλανητικά γεγονότα σχετιζόμενα με στεμματικές εκτοξεύσεις μάζας από τον ήλιο και σε σποραδικές (recurrent) που σχετίζονται με τον ηλιακό άνεμο μεγάλης ταχύτητας.

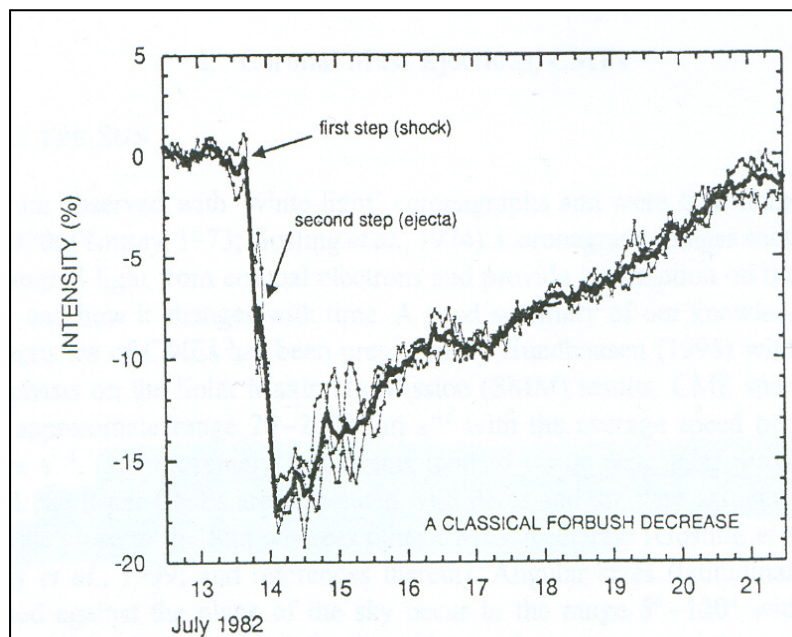
Στα πλαίσια της παρούσας εργασίας παρουσιάζεται ένα νέο μοντέλο για τις μειώσεις Forbush (FORD Model) το οποίο στηρίζεται στη μέθοδο των συντελεστών σύζευξης (coupling functions) της πρωτογενούς ροής της κοσμικής ακτινοβολίας με τη δευτερογενή, το οποίο θα μπορεί να εφαρμοστεί σε γεγονότα μειώσεων Forbush επιτρέποντας τον υπολογισμό των τιμών διάφορων χαρακτηριστικών παραμέτρων, όπως του φασματικού δείκτη. Το μοντέλο αυτό κάνει χρήση των δεδομένων που παρέχονται από το Διεθνές Κέντρο Λήψης και Επεξεργασίας Δεδομένων Μετρητών Νετρονίων του Πανεπιστημίου Αθηνών (ANMODAP CENTER) και εφαρμόστηκε στη μείωση Forbush που σημειώθηκε στο τέλος του Νοεμβρίου 2000. Πρόκειται για ένα ιδιαίτερα σημαντικό γεγονός αφού κατά τον χρόνο εξέλιξής του καταγράφηκαν 5 ηλιακές εκλάμψεις τάξης X, 10 ηλιακές εκλάμψεις τάξης M, ενώ στις 24/11 σημειώθηκε ισχυρό πρωτονικό γεγονός, που αντιστοιχεί σε καταιγίδα τάξης S3 (ταξινόμηση NOAA), και η ροή των πρωτονίων με ενέργεια μεγαλύτερη των 10MeV έφτασε την τιμή των 1000 pfu. Ο αντίκτυπος της διαταραγμένης αυτής περιόδου καταγράφηκε από τους μετρητές νετρονίων και συγκεκριμένα το πλάτος της μεταβολής της έντασης της κοσμικής ακτινοβολίας ξεπέρασε την τιμή ~ 8 % στους πολιτικούς σταθμούς. Κατόπιν μιας συνολικής περιγραφής καθώς και μίας εκτεταμένης ανάλυσης σε ότι αφορά τα χαρακτηριστικά της καταγεγραμμένης μείωσης Forbush, παρουσιάζονται κάποια πρώτα αποτελέσματα από την εφαρμογή του νέου μοντέλου.

Λέξεις κλειδιά: Κοσμική Ακτινοβολία, Μειώσεις Forbush, Παγκόσμιο Δίκτυο Μετρητών Νετρονίων.

Εισαγωγή

Οι μειώσεις Forbush (FD) της έντασης της κοσμικής ακτινοβολίας είναι ένα ηλιοσφαιρικό φαινόμενο, που αφορά στις μεταβολές της πυκνότητας και της ανισοτροπίας των γαλαξιακών κοσμικών ακτίνων, οι οποίες προκαλούνται από διαδιδόμενες διαταραχές του ηλιακού ανέμου μεγάλης κλίμακας. Οι μειώσεις Forbush διακρίνονται σε μη περιοδικές (non-recurrent decreases) και σε σποραδικές (recurrent decreases). Οι πρώτες οφείλονται σε παροδικά διαπλανητικά γεγονότα σχετιζόμενα με στεμματικές εκτοξεύσεις μάζας από τον ήλιο (coronal mass ejections – CME). Οι δεύτερες σχετίζονται με τον ηλιακό άνεμο μεγάλης ταχύτητας (Lockwood J., 1971). Τόσο οι στεμματικές εκτοξεύσεις μάζας όσο και τα μέτωπα κρούσης ενδέχεται να σχετίζονται και με τις ηλιακές εκλάμψεις (solar flares – SF). Ειδικότερα, οι μη περιοδικές μειώσεις παρουσιάζουν μια απότομη έναρξη, φτάνουν στο μέγιστο πλάτος τους σε χρονικό διάστημα περίπου μιας ημέρας και κατόπιν διανύουν μια περίοδο ανάκαμψης διάρκειας αρκετών ημερών. Οι σποραδικές μειώσεις Forbush εμφανίζουν μια βαθμιαία έναρξη και έχουν πιο συμμετρικό προφίλ. Συχνά ο όρος «μείωση Forbush» χρησιμοποιείται επιλεκτικά προκειμένου να χαρακτηρίσει τις μειώσεις του πρώτου είδους. Στη βάση αυτής της σύμβασης είναι γραμμένο και το παρόν κείμενο.

Ένα τυπικό παράδειγμα μιας μείωσης Forbush παρουσιάζεται στην Εικόνα 1. Όπως είναι φανερό μια μείωση Forbush χαρακτηρίζεται από την εμφάνιση δυο βημάτων (Barnden L., 1973). Το πρώτο βήμα παρουσιάζεται εξαιτίας του κρουστικού κύματος, ενώ το δεύτερο εξαιτίας της εκτοξευμένης μάζας από το στέμμα του Ήλιου (εικόνα 1).



Εικόνα 1: Τυπική μείωση Forbush στην οποία διακρίνεται ο μηχανισμός των δυο βημάτων

Για πολύ μεγάλο χρονικό διάστημα ήταν ευρέως διαδεδομένη η άποψη ότι μειώσεις της έντασης της κοσμικής ακτινοβολίας εμφανίζονται μόνο κατά την διάρκεια γεωμαγνητικών καταιγίδων, ωστόσο, σήμερα γνωρίζουμε ότι μειώσεις Forbush καταγράφονται ακόμη και υπό σχετικά 'ήρεμες' γεωμαγνητικές συνθήκες. Επίσης, ανάλογες μειώσεις παρατηρούνται όχι μόνο μέσα στην μαγνητόσφαιρα της Γης, αλλά ακόμη και σε διαστημόπλοια μακριά από τους πλανήτες και τις μαγνητόσφαιρές τους (Belov A., 2000). Είναι πλέον γνωστό ότι υπάρχει σημαντική συσχέτιση ανάμεσα στις καταγεγραμμένες μεταβολές της έντασης της κοσμικής ακτινοβολίας και σε ένα πλήθος παραμέτρων που σχετίζονται με την ηλιακή δραστηριότητα και χαρακτηρίζουν τις διάφορες φάσεις

του 11-ετή ηλιακού κύκλου (Forbush S., 1954; 1958). Εμπεριστατωμένες μελέτες αναδεικνύουν την στατιστική συσχέτιση των ηλιακών εκλάμψεων (SF) και των στεμματικών εκτοξεύσεων μάζας (CME) με την εμφάνιση μειώσεων Forbush. Οι ηλιακές εκλάμψεις (SF) εμφανίζονται ως αιφνίδιες, αστραπιαίες και έντονες μεταβολές της φωτεινότητας σε κάποιες περιοχές του Ηλίου και απελευθερώνουν μεγάλα ποσά ενέργειας από την ηλιακή ατμόσφαιρα. Η ακτινοβολία που εκπέμπεται ενεργοποιεί σχεδόν ολόκληρο το ηλεκτρομαγνητικό φάσμα από τα ραδιοκύματα μέχρι τις ακτίνες-X και γ. Οι εκτοξεύσεις στεμματικού υλικού (CME) ουσιαστικά αποτελούν εκροή πλάσματος από τον ήλιο με τη μορφή ηλιακής προεξοχής η οποία βαθμιαία αποκτά ταχύτητα και εκτοξεύεται στο διάστημα. Τα μέτωπα κρούσης που δημιουργούνται σε αυτές τις περιοχές επηρεάζουν την πυκνότητα της κοσμικής ακτινοβολίας τόσο τοπικά όσο και σε μακρινές αποστάσεις από το σημείο εκτόξευσης του πλάσματος. Τα ενεργητικά σώματα που εκπέμπονται μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τον προσδιορισμό των εκτοξεύσεων μάζας στον διαπλανητικό χώρο (Cane H., 2000).

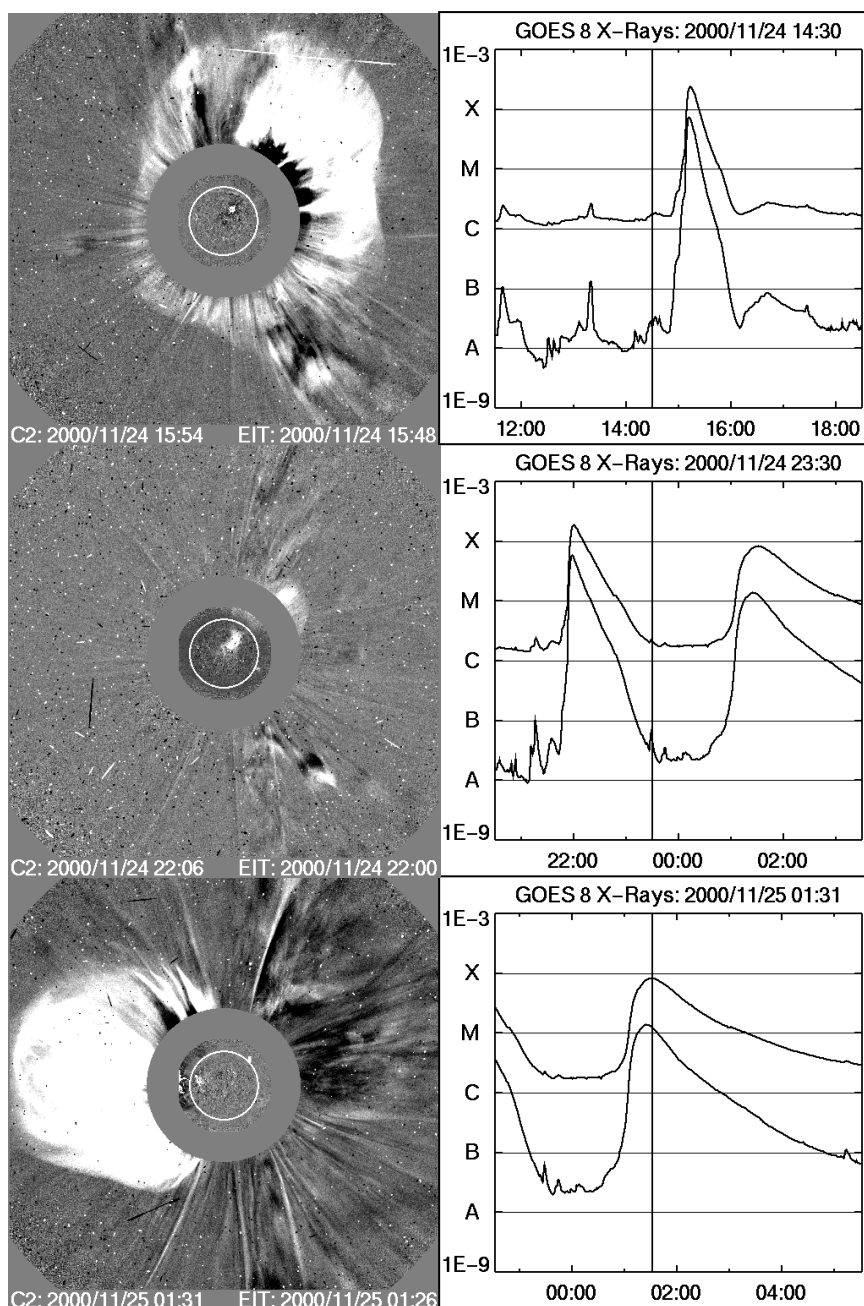
Μέχρι σήμερα έχουν πραγματοποιηθεί ουσιαστικές προσπάθειες αποκωδικοποίησης των μηχανισμών που δημιουργούν μειώσεις Forbush. Σύμφωνα με αυτές υπάρχουν τρία είδη στεμματικών εκτοξεύσεων μάζας που σχετίζονται με τις μειώσεις Forbush: α) μειώσεις εξαιτίας των κρουστικών κυμάτων των CME, β) μειώσεις εξαιτίας της εκτοξευμένης από το στέμμα του Ήλιου μάζας και γ) μειώσεις που οφείλονται τόσο στα κρουστικά κύματα όσο και στην εκτοξευμένη μάζα. Η πλειονότητα των μειώσεων Forbush μικρής διάρκειας, ακολουθούν το πρότυπο που παρουσιάζεται στην Εικόνα 1 και σχετίζονται τόσο με τα κρουστικά κύματα όσο και την εκτοξευμένη μάζα (Cane H. et al., 1996). Ο μηχανισμός εμφάνισης των μειώσεων Forbush της έντασης της κοσμικής ακτινοβολίας αρχικά αποδόθηκε στην αποκοπή των σωματιδίων από κρουστικά κύματα τα οποία παράγονται εξαιτίας των ηλιακών εκλάμψεων. Οι ενεργητικές αυτές ηλιακές εκλάμψεις είναι ικανές να προκαλέσουν αιφνίδιες ενάρξεις καταγίδων (Sudden Storm Commencements - SCC) και είναι γνωστές με την ονομασία: γεω-δυναμικές εκλάμψεις. Πρόσφατα, προτάθηκε ότι οι ηλιακές εκλάμψεις, αν και δεν προκαλούν τις στεμματικές εκτοξεύσεις μάζας, καθορίζουν το γεωγραφικό πλάτος του Ήλιου από το οποίο θα εμφανιστούν οι τελευταίες. Δηλαδή, οι μειώσεις Forbush εμφανίζονται κυρίως λόγω των στεμματικών εκροών μάζας και των διαπλανητικών κρουστικών κυμάτων που αυτά δημιουργούν ενώ μπορούν να συσχετιστούν με ισχυρές ηλιακές εκλάμψεις. Τα πιο πρόσφατα κριτήρια συσχέτισης των διαφορετικών ηλιακών γεγονότων που λαμβάνουν χώρα πριν η και κατά τη διάρκεια μιας μείωσης Forbush θα χρησιμοποιηθούν στην εργασία αυτή και διατυπώνονται ως εξής (Shrivastava P., 2005): α) η ηλιακή έκλαμψη (SF) θα πρέπει να έχει σημειωθεί μέχρι και τέσσερις ημέρες προτού καταγραφεί η μείωση Forbush, β) η στεμματική εκροή μάζας θα πρέπει να έχει καταγραφεί μέσα σε ένα χρονικό παράθυρο 24 ωρών από την στιγμή εμφάνισης της ηλιακής έκλαμψης & γ) η στεμματική εκροή μάζας θα πρέπει να έχει καταγραφεί το πολύ τρεις ημέρες πριν από την έναρξη της μείωσης Forbush.

Στα πλαίσια της παρούσας εργασίας πραγματοποιήθηκε μελέτη του γεγονότος μείωσης Forbush της περιόδου Νοέμβριος-Δεκέμβριος 2000. Επιπλέον κατασκευάστηκε ένα πρώτο μοντέλο σύνδεσης της πρωτογενούς ροής της κοσμικής ακτινοβολίας στο όριο της ατμόσφαιρας με τη δευτερογενή που καταγράφηκε από τους μετρητές νετρονίων κατά τη διάρκεια του συγκεκριμένου γεγονότος. Το μοντέλο αυτό (FORbush Decrease Model ή FORD) αποτελεί μία πρώτη ισοτροπική προσέγγιση και επιχειρεί να ερμηνεύσει κάποια βασικά χαρακτηριστικά του φαινομένου.

Το γεγονός του Νοεμβρίου 2000

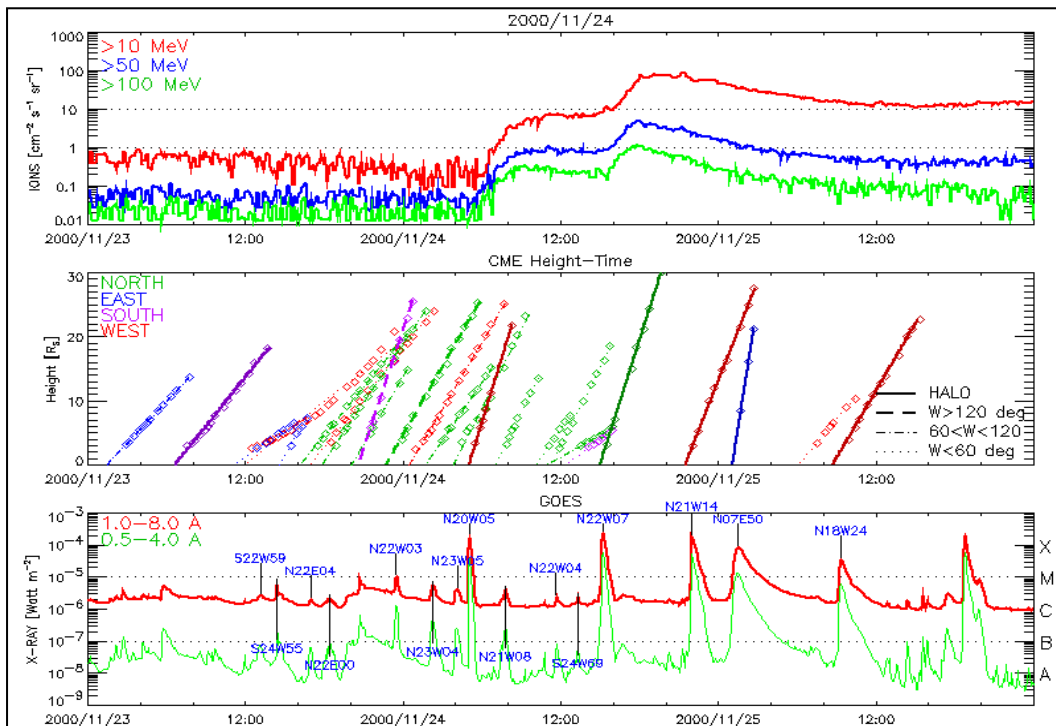
Η μείωση Forbush της έντασης της κοσμικής ακτινοβολίας που σημειώθηκε στις 26 Νοεμβρίου 2000 ήταν ένα ιδιαίτερα σημαντικό γεγονός αφού κατά τον χρόνο εξέλιξής του καταγράφηκαν 5 ηλιακές εκλάμψεις ακτίνων X, τάξης X, και 10 ηλιακές εκλάμψεις ακτίνων X, τάξης M. Επιπλέον, στις 24/11 σημειώθηκε ισχυρό πρωτονικό γεγονός, που αντιστοιχεί σε καταιγίδα τάξης S3¹ (ταξινόμηση NOAA), με τη ροή πρωτονίων ενέργειας μεγαλύτερη των 10MeV να φτάνει την τιμή των 1000 pfu. Η διαταραγμένη αυτή περίοδος είχε αντίκτυπο στις διακυμάνσεις της κοσμικής ακτινοβολίας που καταγράφηκαν από τους μετρητές νετρονίων. Συγκεκριμένα το πλάτος της μεταβολής της έντασης της κοσμικής ακτινοβολίας ξεπέρασε την τιμή ~ 8 % στους πολικούς σταθμούς.

¹ NOAA: <http://noaa.gov>



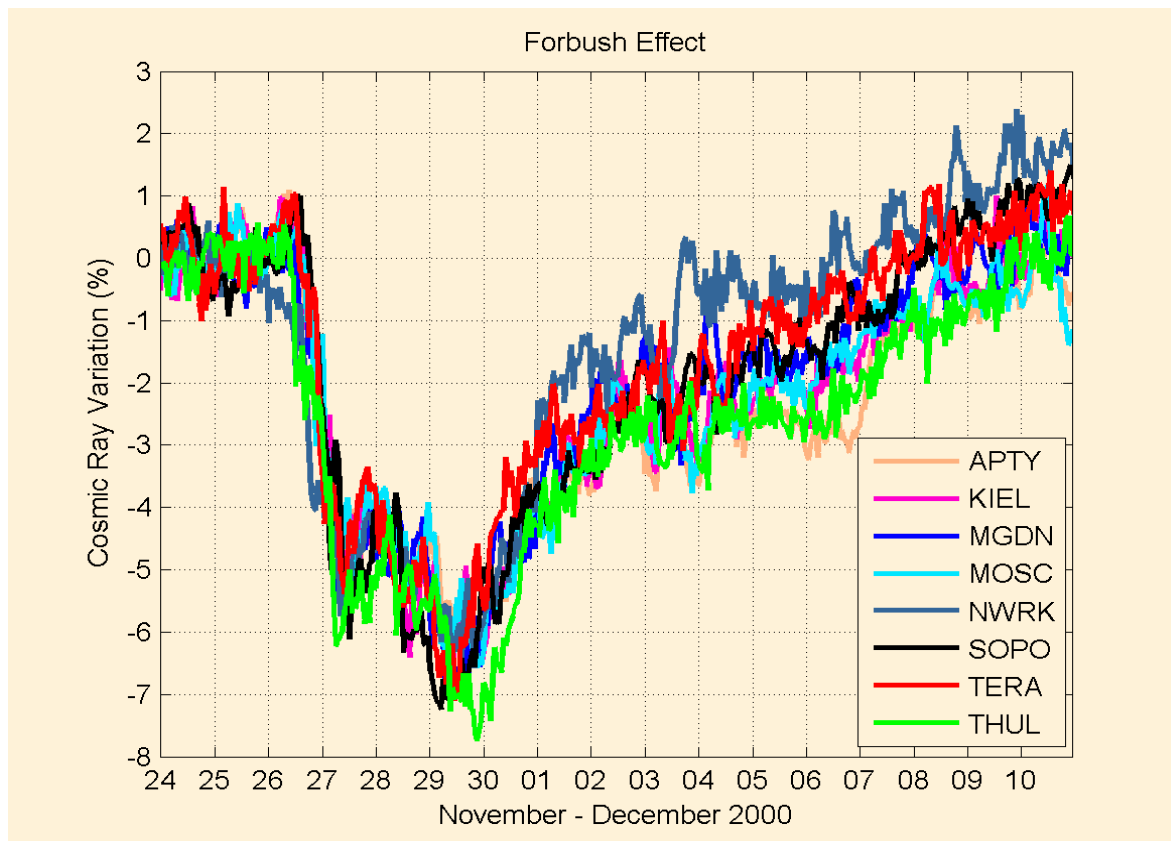
Εικόνα 2: Οι ηλιακές εκλάμψεις (δεξιά γραφήματα) και οι συνεπακόλουθες στεμματικές εκτοξεύσεις μάζας στις 24 και 25/11/2000.

Την περίοδο πριν την έναρξη της μείωσης της έντασης της κοσμικής ακτινοβολίας (στις 26/11/2000) σημειώθηκαν τρεις ισχυρότατες στεμματικές εκτοξεύσεις μάζας (Halo CMEs) οι οποίες και σχετιζόνταν με αντίστοιχες ηλιακές εκλάμψεις που προηγήθηκαν αυτών. Αναλυτικά, οι στεμματικές εκτοξεύσεις μάζας που καταγράφηκαν ήταν οι ακόλουθες: α) στις 24/11 στις 15:30 UT με ταχύτητα 1245 km/h; β) στις 24/11 στις 22:06 UT με ταχύτητα 1005 km/h και γ) στις 25/11 στις 01:38 UT με ταχύτητα 2519 km/h (Εικόνα 2).



Εικόνα 3: Απεικόνιση της ροής των πρωτονίων όπως καταγράφηκαν από τους δορυφόρους GOES, των στεμματικών εκροών μάζας που καταγράφηκαν την περίοδο 23/11/2000-26/11/2000 και των αντίστοιχων ηλιακών εκλάμψεων.

Συγκεκριμένα, στις 24/11 και ώρα 14:51 UT καταγράφηκε ηλιακή έκλαμψη ακτίνων X της τάξεως X23 η οποία και προηγήθηκε τις στεμματικής εκροής μάζας που σημειώθηκε στις 15:30 UT, την ίδια ημέρα. Λίγο αργότερα, στις 21:43 UT καταγράφηκε εκ νέου ηλιακή έκλαμψη τάξης X18, μόλις είκοσι-τρία λεπτά πριν από την εκδήλωση μιας νέας στεμματικής εκροής μάζας στις 22:06 UT. Τέλος στις 25/11 και ώρα 01:31 UT σημειώθηκε ηλιακή έκλαμψη τάξης M82 η οποία και σχετίζεται με την έντονη στεμματική εκροή μάζας που καταγράφηκε στις 01:38 UT, την ίδια μέρα. Το σύνολο των παραπάνω γεγονότων ικανοποιούν τα κριτήρια που έχουν προαναφερθεί. Δεδομένης της συσχέτισης αυτής, οι μεταβολές, που ήταν αναμενόμενο να σημειωθούν στην διακύμανση της έντασης της κοσμικής ακτινοβολίας - εξαιτίας της ηλιακής διαμόρφωσης, ήταν σημαντικές. Ειδικότερα, σε πολικούς σταθμούς το συνολικό πλάτος της καταγεγραμμένης μείωσης έφτασε ~ 8%, ενώ στους σταθμούς μεσαίου γεωγραφικού πλάτους η μείωση έφτασε σε πλάτος ~6% όπως για παράδειγμα συνέβη στον σταθμό της Μόσχας. Μια συνοπτική εικόνα που αποδίδει τη καταγραφή του γεγονότος από ένα σύνολο μετρητών νετρονίων σε διαφορετικούς σταθμούς κοσμικής ακτινοβολίας παρουσιάζεται στην εικόνα 4.



Εικόνα 4: Η μείωση Forbush της περιόδου Νοέμβριος-Δεκέμβριος 2000, όπως καταγράφηκε από ένα σύνολο σταθμών κοσμικής ακτινοβολίας του παγκόσμιου δικτύου (APTY=Apatity, KEIL=Kiel, KGDN=Magadan, MOSC=Moscow, NWRK=Newark, SOPO=South Pole, TERA=Teradelie, THUL=Thule).

Το νέο μοντέλο των μειώσεων FORBUSH

Ένας προηγμένος τρόπος ανάλυσης της φυσιολογίας των διαφόρων ειδών διακυμάνσεων της κοσμικής ακτινοβολίας που παρατηρούνται στη γη καθώς επίσης και απόκτησης ποσοτικής πληροφορίας σχετικά με τις πηγές των μεταβολών τους, είναι η μέθοδος των συντελεστών σύζευξης, η οποία στην αρχική της μορφή κατασκευάστηκε από τον Dorman το 1954 και χρησιμοποιεί δεδομένα επίγειων μετρητών (Dorman L., 1974). Μπορεί να χρησιμοποιηθεί στην ανάλυση πλήθους φαινομένων κοσμικής ακτινοβολίας (επίγειες επαυξήσεις της έντασης, μαγνητοσφαιρικά φαινόμενα, μειώσεις Forbush κ.λ.π.) ενώ βρίσκει ολοένα και περισσότερες εφαρμογές - ειδικότερα στα πλαίσια της ανάπτυξης προγραμμάτων πρόγνωσης διαστημικού καιρού. Πρόσφατα μία επέκταση της μεθόδου των συντελεστών σύζευξης πραγματοποιήθηκε προκειμένου να κατασκευαστεί ένα μοντέλο (NM BANGLE Model) μέσα από το οποίο είναι δυνατή η μελέτη των γεγονότων επίγειας επαύξης της έντασης της κοσμικής ακτινοβολίας στη βάση των επίγειων δεδομένων μετρητών νετρονίων του παγκοσμίου δικτύου (Plainaki C. et al., 2006).

Στα πλαίσια της παρούσας μελέτης επιχειρήθηκε η κατασκευή ενός μοντέλου σύνδεσης της πρωτογενούς ροής της κοσμικής ακτινοβολίας στο όριο της ατμόσφαιρας, με τη δευτερογενή η οποία καταγράφεται από τους μετρητές νετρονίων κατά τη διάρκεια των

μειώσεων Forbush. Το μοντέλο αυτό (FORbush Decrease Model-FORD) αποτελεί μία πρώτη ισοτροπική προσέγγιση, η οποία εφαρμοζόμενη στην περίπτωση του γεγονότος της 26ης Νοεμβρίου 2000 επιχειρεί να ερμηνεύσει κάποια βασικά χαρακτηριστικά των μειώσεων Forbush..

Σύμφωνα με το μοντέλο FORD, μία επίγεια μεταβολή στην ένταση των παρατηρούμενων κοσμικών ακτίνων οφειλόμενη στην άφιξη ηλιακών κοσμικών σωματίων μπορεί να αποδοθεί στη μεταβολή του πρωτογενούς φάσματός τους στα όρια της ατμόσφαιρας. Συνεπώς στην περίπτωση μελέτης των μειώσεων Forbush μπορεί κανείς να γράψει:

$$\delta N(R_c(t), h_o(t), t) / N_o = \int_{R_{co}}^{\infty} \frac{\Delta D(R, t)}{D_o(R)} W_i(R_{co}, R) dR \quad (1)$$

όπου $\delta N(R_c(t), h_o(t), t) / N_o$ η σχετική μεταβολή της επίγειας κοσμικής ακτινοβολίας που καταγράφεται από έναν μετρητή νετρονίων κατωφλίου μαγνητικής δυσκαμψίας R_{co} , $W_i(R_{co}, R)$ η συνάρτηση σύζευξης (coupling function) μεταξύ των σχετικών διακυμάνσεων της πρωτογενούς ροής ηλιακών ενεργητικών σωματίων και της δευτερογενούς, $D_o(R)$ το διαφορικό φάσμα δυσκαμψίας του γαλαξιακού υποβάθρου, και $\Delta D(R, t)$ το διαφορικό φάσμα δυσκαμψίας των ηλιακών ενεργητικών σωματίων. Η σχέση (1) αποτελεί τη βασική εξίσωση του μοντέλου FORD και συνδέει την παρατηρούμενη δευτερογενή κοσμική ακτινοβολία με την αντίστοιχη πρωτογενή, κατά τη διάρκεια ενός γεγονότος. Οι παράμετροι που χαρακτηρίζουν τις ιδιότητες των ηλιακών ενεργητικών σωματίων, καθώς και το ενεργειακό τους φάσμα (το οποίο στη συγκεκριμένη μελέτη θεωρήθηκε ισοτροπικό) μπορούν να προσδιοριστούν αποκλειστικά και μόνο από τις διακυμάνσεις που καταγράφει το παγκόσμιο δίκτυο μετρητών νετρονίων. Το αντίστοιχο σύστημα εξισώσεων που θα πρέπει να επιλυθεί προκειμένου να εφαρμοστεί το μοντέλο πάνω σε ένα συγκεκριμένο γεγονός θα έχει τόσες εξισώσεις όσος είναι ο αριθμός των σταθμών από τους οποίους είναι διαθέσιμα τα δεδομένα κοσμικής ακτινοβολίας. Οι συναρτήσεις σύζευξης για τους μετρητές νετρονίων του παγκόσμιου δικτύου μπορούν να περιγραφούν από τη γενικότερη σχέση (Clem J. & Dorman L., 2000):

$$W(R_{co}, R, h_o) = \begin{cases} 0 & R \leq R_{co} \\ a(h_o)k(h_o)R^{-(k_i(h_o)+1)} \exp(-a(h_o)R^{-k(h_o)})(1 - \exp(-a(h_o)R_{co}^{-k(h_o)}))^{-1} & R > R_{co} \end{cases} \quad (2)$$

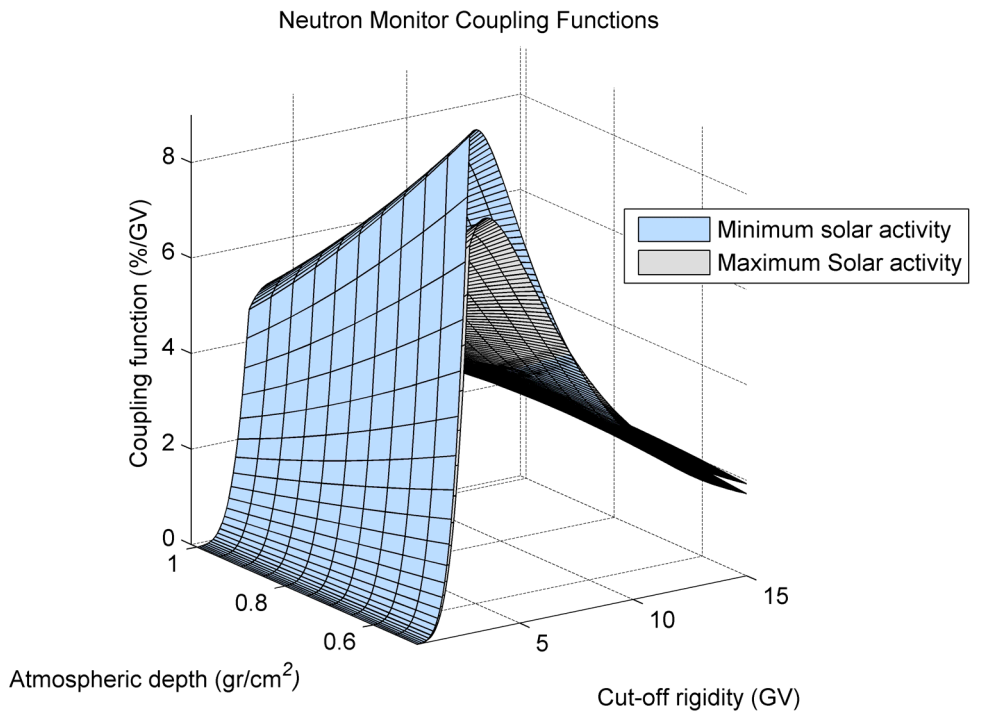
όπου οι παράμετροι R_{co}, h_o αποτελούν το κατώφλι δυσκαμψίας και το ατμοσφαιρικό βάθος στο οποίο είναι τοποθετημένος ο μετρητής αντίστοιχα και τα a, k εξαρτώνται από την ηλιακή δραστηριότητα. Στην πραγματικότητα όμως η έκφραση (2) είναι έγκυρη μόνο για εκείνη την περιοχή του φάσματος όπου η κινητική ενέργεια των σωματίων είναι μεγαλύτερη από $\sim 2 \text{ GeV/nucleon}$ (ή αντίστοιχα η δυσκαμψία μεγαλύτερη από $\sim 2.78 \text{ GV}$). Στην περιοχή των χαμηλών ενεργειών $0.5 \text{ GeV} < E < 2 \text{ GeV}$ (ή $1 \text{ GV} < E < 2.78 \text{ GV}$) έχει βρεθεί ότι W ακολουθεί νόμο δύναμης $\sim E_k^{3.17}$ (Belon A. & Struminsky A., 1997). Κατά συνέπεια η συνάρτηση σύζευξης της πρωτογενούς με τη δευτερογενή κοσμική ακτινοβολία που καταγράφεται σε ένα μετρητή νετρονίων δίνεται από τη σχέση:

$$W(R, h)dR = \begin{cases} W_T(R, h)dR & , R \geq 2.78 \text{ GV} \\ W(R = 2.78 \text{ GV}, h) \left(\frac{E}{2 \text{ GeV}} \right)^{3.17} dR & , R < 2.78 \text{ GV} \end{cases} \quad (3)$$

όπου

$$W_T(R, h, t_0) = a \cdot (k-1) \cdot \exp(-a \cdot R^{-k+1}) R^{-k} \quad (4)$$

Η συνάρτηση της σχέσης (3) έχει χρησιμοποιηθεί πολλές φορές μέχρι τώρα στη μελέτη τόσο των γαλαξιακών κοσμικών ακτίνων όσο και των ηλιακών κοσμικών ακτίνων (Belon A. & Eroshenko E., 1996; Belon A. et al., 2005a; b; Plainaki C. et al., 2006). Μια γραφική απεικόνιση των συναρτήσεων σύζευξης στο ελάχιστο και στο μέγιστο της ηλιακής δραστηριότητας δίνεται στην εικόνα 5.



Εικόνα 5: Συναρτήσεις σύζευξης μετρητών νετρονίων

Στο μοντέλο FORD το διαφορικό φάσμα της πρωτογενούς κοσμικής ακτινοβολίας στο όριο της ατμόσφαιρας έχει ληφθεί ισοτροπικό ακολουθώντας ένα νόμο δύναμης ως προς τη δυσκαμψία. Συνεπώς σε κάποια χρονική στιγμή t μπορεί να εκφραστεί ως εξής:

$$\Delta D(R, t) = A \cdot R^{\gamma(t)} \quad (5)$$

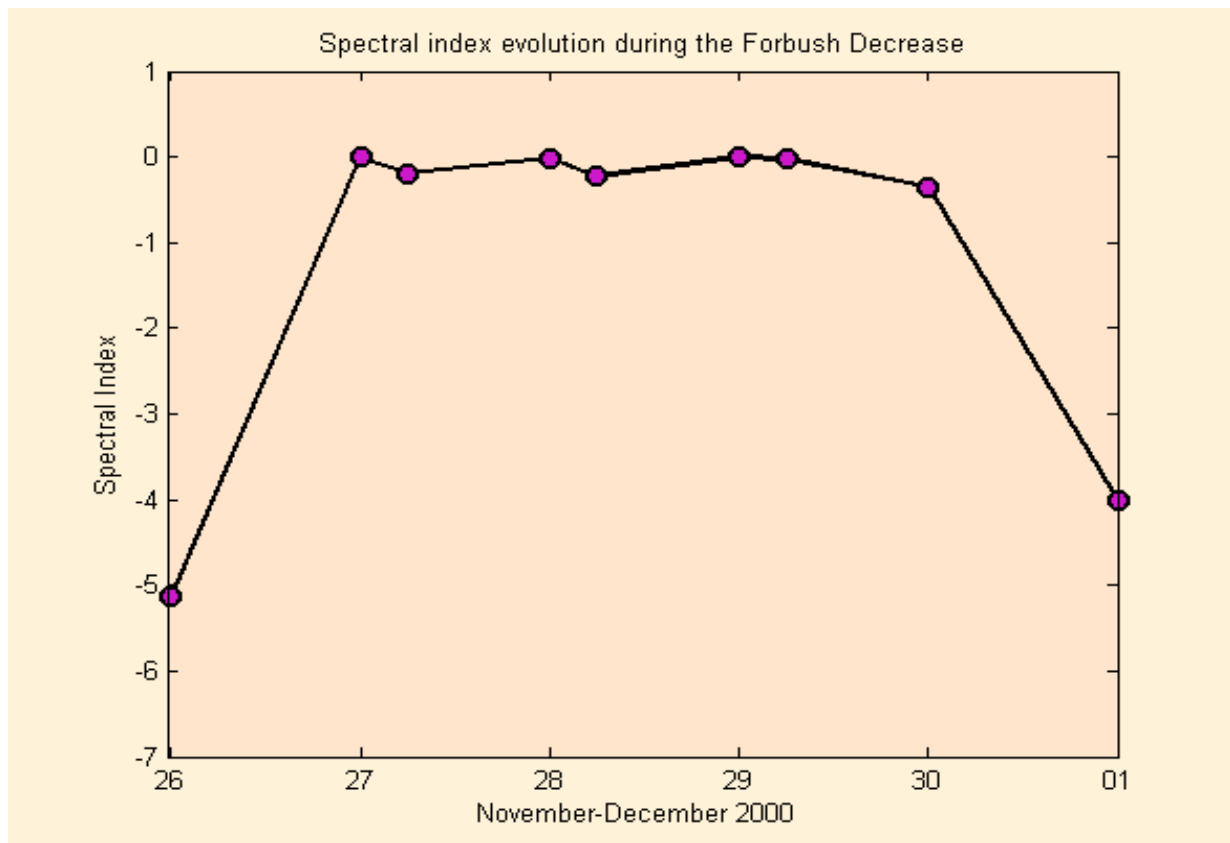
Είναι σημαντικό να τονίσουμε ότι το διαφορικό φάσμα δυσκαμψίας των γαλαξιακών κοσμικών ακτίνων επιλέχθηκε με τέτοιο τρόπο ώστε να απεικονίζει τις διαδικασίες επιτάχυνσής τους.

Εφαρμογή του μοντέλου

Το μοντέλο FORD εφαρμόστηκε για την περίπτωση του γεγονότος της 26^{ης} Νοεμβρίου 2000. Χρησιμοποιήθηκαν ωριαία δεδομένα μετρητών νετρονίων από συνολικά 8 σταθμούς κοσμικής ακτινοβολίας, οι οποίοι είναι κατανεμημένοι στη γη με τέτοιο τρόπο έτσι ώστε να καλύπτουν ένα σημαντικό εύρος κατωφλίων δυσκαμψίας και ασυμπτωτικών διευθύνσεως άφιξης πρωτογενών σωματίων. Το μη γραμμικό πρόβλημα βελτιστοποίησης που προκύπτει εφαρμόζοντας την εξίσωση (1) επιλύθηκε με βάση τον αλγόριθμο: Gauss-Newton-Levenberg-Marquardt (GNLM), ο οποίος αποτελεί τον πλέον αξιόπιστο τρόπο αντιμετώπισης προβλημάτων αυτού του είδους.

Τα αποτελέσματα της εφαρμογής του μοντέλου FORD στο γεγονός της 26^{ης} Νοεμβρίου 2000 έδωσαν σημαντική πληροφορία πάνω στο φάσμα των πρωτογενών γαλαξιακών κοσμικών ακτίνων στο όριο της ατμόσφαιρας. Από την Εικόνα 6, η οποία αντιστοιχεί στην καθοδική φάση της μείωσης Forbush του Νοεμβρίου 2000, μπορεί να ληφθεί μια πρώτη εικόνα της ενεργειακής κατανομής των γαλαξιακών κοσμικών ακτίνων σε διαφορετικές χρονικές στιγμές. Κατά την αρχική φάση του φαινομένου το φάσμα δυσκαμψίας που περιγράφεται από την εξίσωση (5) είναι σχετικά μαλακό ($\gamma \sim 5$). Σταδιακά γίνεται πιο σκληρό γεγονός που φανερώνει την άφιξη όλο και περισσότερο ενεργητικών σωματίων. Στο χρονικό διάστημα 27/11-30/11 ο φασματικός δείκτης κυμαίνεται μεταξύ των τιμών -0.35 και 0 ενώ καθώς ξεκινά η ανοδική φάση πέφτει στην τιμή -4. Οι διαφορές αυτές οφείλονται πιθανότατα στο διαπλανητικό μαγνητικό πεδίο και συγκεκριμένα στις επιπρόσθετες ανωμαλίες μεγάλης κλίμακας, δηλαδή στα κύματα Alfvén και στα μαγνητοσφαιρικά κύματα (Wawrzynczak A. & Alania M., 2005). Οι ανωμαλίες αυτές πρέπει να σχετίζονται με τη μη-γραμμική αλληλεπίδραση των διαταραχών υψηλής ταχύτητας με τον υποκείμενο ηλιακό άνεμο. Σύμφωνα με την εικόνα 6, η διαδικασία δημιουργίας των ανωμαλιών πρέπει να είχε ολοκληρωθεί μέσα στην περίοδο 27/11-30/11.

Αντίστοιχα αποτελέσματα πάνω στη χρονική εξέλιξη του φασματικού δείκτη έχουν εξαχθεί στο παρελθόν για γεγονότα μειώσεων Forbush παρόμοια με το γεγονός του Νοεμβρίου 2000. Ο φασματικός δείκτης κατά τη διάρκεια του γεγονότος του Οκτωβρίου 2003 παρουσιάζει μια συμπεριφορά πολύ κοντινή σε αυτήν που υπολογίστηκε στη βάση του μοντέλου FORD για τη μείωση Forbush του Νοεμβρίου 2000 (Wawrzynczak A. & Alania M., 2005). Στο σημείο αυτό είναι σημαντικό να τονιστεί ότι οι μειώσεις Forbush αποτελούν ένα πολύ σύνθετο φαινόμενο, η χρονική εξέλιξη του οποίου εμφανίζει σημαντικές διαφοροποιήσεις από γεγονός σε γεγονός. Έτσι η μελέτη τους καθίσταται αρκετά επίπονη αφού στην πραγματικότητα υπάρχει ένα σύνολο παραγόντων που δύνανται να τις επηρεάσουν. Ως εκ τούτου, μια μετέπειτα εκδοχή του μοντέλου FORD έχει σκοπό να συμπεριλάβει επιπλέον στοιχεία όπως π.χ. την ανισοτροπία των γαλαξιακών κοσμικών ακτίνων στο όριο της ατμόσφαιρας.



Εικόνα 6: Συναρτήσεις σύζευξης μετρητών νετρονίων

Συμπεράσματα

Στα πλαίσια της παρούσας εργασίας μελετήθηκε η μείωση Forbush του Νοεμβρίου 2000, η οποία ήταν ένα ιδιαίτερα σημαντικό γεγονός αφού κατά τον χρόνο εξέλιξής της καταγράφηκαν συνολικά 15 ηλιακές εκλάμψεις ακτίνων X. Επιπλέον, στις 24/11 σημειώθηκε ισχυρό πρωτονικό γεγονός, που αντιστοιχεί σε καταιγίδα τάξης S3, με τη ροή πρωτονίων ενέργειας μεγαλύτερη των 10MeV να φτάνει την τιμή των 1000 pfu. Οι μετρητές νετρονίων κατέγραψαν μειώσεις στην ένταση της κοσμικής ακτινοβολίας που ξεπέρασαν κατά απόλυτη τιμή το ~ 8 % στους πολικούς σταθμούς.

Προκειμένου να μελετηθούν λεπτομερώς οι μειώσεις Forbush και να ληφθεί πληροφορία για τα χαρακτηριστικά τους κατασκευάστηκε ένα καινούργιο μοντέλο το οποίο στηρίζεται στη μέθοδο των συντελεστών σύζευξης (coupling functions) της πρωτογενούς ροής της κοσμικής ακτινοβολίας με τη δευτερογενή (FORD Model). Το μοντέλο αυτό κάνει χρήση των δεδομένων που παρέχονται από το Διεθνές Κέντρο Λήψης και Επεξεργασίας Δεδομένων Μετρητών Νετρονίων του Πανεπιστημίου Αθηνών (ANMODAP CENTER, Manromichalaki et al., 2005a) και εφαρμόστηκε στη μείωση Forbush που σημειώθηκε στο τέλος του Νοεμβρίου 2000.

Τα σημαντικότερα συμπεράσματα από τη μελέτη του γεγονότος του Νοεμβρίου 2000 καθώς και τα πρώτα αποτελέσματα της εφαρμογής του μοντέλου FORD συνοψίζονται στα παρακάτω σημεία:

- Κατά την αρχική φάση του φαινομένου το φάσμα δυσκαμψίας είναι σχετικά μαλακό ($\gamma \sim 5$).
- Σταδιακά το φάσμα γίνεται πιο σκληρό γεγονός που φανερώνει την άφιξη όλο και περισσότερου ενεργητικών σωματίων.
- Οι διακυμάνσεις του φασματικού δείκτη κατά τη διάρκεια των διαφόρων φάσεων του γεγονότος αντικατοπτρίζουν τις επιπρόσθετες ανωμαλίες μεγάλης κλίμακας του διαπλανητικού μαγνητικού πεδίου που σχετίζονται με τη μη-γραμμική αλληλεπίδραση των διαταραχών υψηλής ταχύτητας με τον υποκείμενο ηλιακό άνεμο. Σύμφωνα με το μοντέλο FORD η διαδικασία δημιουργίας των ανωμαλιών πρέπει να είχε ολοκληρωθεί μέσα στην περίοδο 27/11-30/11.

Δεδομένου ότι οι μειώσεις χαρακτηρίζουν τη μεταβλητότητα των συνθηκών στο Διαστημικό περιβάλλον και στον ήλιο, η κατανόηση των μηχανισμών που λαμβάνουν χώρα κατά την εξέλιξή τους, η παρακολούθησή καθώς και η πρόγνωσή τους καθίστανται αναγκαίες. Η ανάπτυξη ενός ισχυρού προγράμματος Διαστημικού καιρού με στόχο την μοντελοποίηση, την καταγραφή και την πρόγνωση τόσο των μειώσεων Forbush όσο και άλλων σημαντικών επίγειων φαινομένων (π.χ. GLEs) είναι δυνατόν να εξασφαλίσει την ομαλή λειτουργία των ηλεκτρονικών συστημάτων στο διαστημικό περιβάλλον κοντά στη γη. Ένα τέτοιο πρόγραμμα θα κατασκευαστεί στο σταθμό κοσμικής ακτινοβολίας της Αθήνας με στόχο να δίνει σήμα για την έναρξη μιας μείωσης Forbush ή μιας επίγειας επαύξεσης της έντασης της κοσμικής ακτινοβολίας (ή ενός πρωτονικού γεγονότος) καθώς και μίας γεωμαγνητικής καταιγίδας σε κάθε ενδιαφερόμενο φορέα (Mavromichalaki E. et al., 2005b). Στην τελική του εκδοχή το πρόγραμμα θα μπορεί να δίνει προγνωστικά στοιχεία για το μέγεθος της ροής των ηλιακών ενεργητικών σωματίων, το χρόνο του ελαχίστου (στην περίπτωση μιας μείωσης Forbush) ή του μεγίστου (στην περίπτωση ενός GLE) καθώς και την ανισοτροπία τους, χρησιμοποιώντας τα μοντέλα FORD και NM-BANGLE αντίστοιχα (Plainaki C. et al., 2006).

Ευχαριστίες: Η παρούσα εργασία πραγματοποιήθηκε στα πλαίσια του προγράμματος ΠΥΘΑΓΟΡΑΣ II που χρηματοδοτείται από το Ευρωπαϊκό ταμείο και από Εθνικούς πόρους. Ευχαριστούμε επίσης όλους τους συνεργάτες που παρέχουν τα δεδομένα συνεχούς καταγραφής της έντασης της κοσμικής ακτινοβολίας ως και δορυφορικά δεδομένα μέσω διαδικτύου.

ΑΝΑΦΟΡΕΣ

1. Barnden L. (1973): *Forbush decreases 1966-1972: Their Solar and Inter-planetary Association and their Anisotropies*, Proceedings of the 13th International Cosmic Ray Conference, Vol. 2, p. 127, Denver Colorado
2. Belov A. (2000): *Cosmic Rays in the Heliosphere*, Solar System Research, Vol. 34, issue 2, p.143
3. Belov A. V. and E. A. Eroshenko : *The energy spectra and other properties of the great proton events during 22-nd solar cycle*, Adv. Space Res. 17, 167, 1996.
4. Belov, A. V., and Struminsky A. B.(1997): *Neutron monitor sensitivity to primary protons below 3 GeV derived from data of ground level events*, Proc. 25-th Intern. Cosmic Ray Conf., 1, 201-204
5. Belov, A., E. Eroshenko, H. Mavromichalaki, C. Plainaki and V. Yanke (2005a): *Solar cosmic rays during the extremely high ground level enhancement of February 23, 1956*, Anal. Geophys. 23, 1.
6. Belov, A., E. Eroshenko, H. Mavromichalaki, C. Plainaki and V. Yanke (2005b): *A study of Great Ground Level Enhancement on 23 February, 1956*, Adv. Space Res. 35, 4, 697.
7. Cane H., Richardson I., von Rosenvinge T. (1996): *Cosmic Ray Decreases: 1964-1994*, Journal of Geophysical Research, Vol. 101, p. 21561
8. Cane H. (2000): *Coronal Mass Ejections and Forbush Decreases*, Space Science Reviews, Vol. 93, p.55

9. Clem J. and L. I. Dorman (2000): '*Neutron monitor response functions*', Space Sci. Rev., 93, 1, 335-359.
10. Dorman L., (1974): '*Cosmic Rays*', North-Holland Publishing Company, Amsterdam
11. Forbush S. (1954): '*World-Wide Cosmic-Ray Variations 1937-1952*', Journal of Geophysical Research, Vol. 59, p. 525
12. Forbush S. (1958): '*Cosmic-Ray Intensity Variations during Two Solar Cycles*', Journal of Geophysical Research, Vol. 63, p. 651
13. Lockwood J. (1971): '*Forbush Decreases in the Cosmic Radiation*', Space Science Reviews, Vol. 12, p. 658
14. Mavromichalaki H., Souvatzoglou G., Sarlanis C., Mariatos G., Gerontidou M., Papaioannou A., Plainaki C., Tasis S., Belov A., Eroshenko E., Yanke V. (2005a): '*The new Athens centre on data processing from the neutron monitor network in real time*', Annales Geophysicae, 23, pp.1-8
15. Mavromichalaki H., Gerontidou M., Mariatos G., Plainaki C., Papaioannou A., Sarlanis C., Souvatzoglou G., Belov A., Eroshenko E., Yanke V., Tsimoneas S. (2005b): '*Space Weather forecasting at the New Athens Center: The recent events of January 2005*', IEEE Trans. Nucl. Sci., vol. 52, no 6, pp.2307-2312
16. Plainaki C., A. Belov, E. Eroshenko, H. Mavromichalaki, V. Yanke (2006) : '*Modeling ground level enhancements: the event of 20 January 2005*', Journal of Geophysical Research-Space Physics, 2006 (in press).
17. Shrivastava P. (2005): '*Study of large solar flares in association with halo coronal mass ejections and their helio-longitudinal association with Forbush decreases of the cosmic rays*', Proceedings of the 29th International Cosmic Ray Conference, Vol. 1, p. 355, India
18. Wawrzynczak A and Alania, M. (2005): '*Fluctuations of the interplanetary magnetic field during the Forbush Effects of galactic cosmic ray's*', Acta Physica Polonica B, 36, 5, 1847.